



TITLE:

# Studies on laser processing of glasses for micro- and nanostructures( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Itoh, Sho

---

CITATION:

Itoh, Sho. Studies on laser processing of glasses for micro- and nanostructures. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-09-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19999>

RIGHT:

許諾条件により本文は2017-01-01に公開; The content of chapter 1 was published in Japanese in Journal of Japan Society for Precision Engineering and is made available as an electronic reprint with the permission of JSPE. The papers can be found at the following URL on the J-STAGE:

[[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/76/10/76\\_10\\_1161/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/76/10/76_10_1161/_article/-char/ja/)]

[[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/76/11/76\\_11\\_1266/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/76/11/76_11_1266/_article/-char/ja/)]

[[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/77/7/77\\_7\\_694/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/77/7/77_7_694/_article/-char/ja/)]. Systematic or multiple reproduction or distribution to multiple locations via electronics or other means is prohibited and is subject to penalties under law. The content of section 2.1 was published in Applied Physics A and is made available as an electronic reprint with the permission of Springer. The paper can be found at the following URL on the SpringerLink: [<http://link.springer. ...>]

京都大学	博士（工学）	氏名	伊 東 翔
論文題目	Studies on laser processing of glasses for micro- and nanostructures (レーザによるガラスのマイクロ・ナノ加工に関する研究)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、ガラスと各種レーザとの相互作用を利用することにより実現できた、小径・深穴あけ、密度変化領域（局所熔融領域）の誘起、ナノファイバー生成に関するもので、各プロセスについて作製した構造の解析や現象のその場観察を行うことにより、加工あるいは改質メカニズムについて研究した結果をまとめたものであり、序章及び三章で構成されている。</p> <p>序章では、ガラスのガスバリア性、化学的安定性、透明性といった特性について概説し、さらなる応用のため微細加工技術の開発が重要であることを説明している。各種加工技術の中でレーザ加工が非接触、大気中で加工可能な点で優位であることを述べ、ガラス加工については未だ未解明の領域が存在し、さらなる研究開発の余地があることを説明している。また、ガラスの微細構造の中で、一次元のマイクロ・ナノ構造は半導体のパッケージング、光導波路、創傷被覆への応用が期待できることを述べ、同時に、実用レベルに到達していない作製方法については、新たな加工方法の研究開発が必須であることを強調し、本研究の意義を説明している。</p> <p>第一章では、ガラスに波長 266 nm の UV ナノ秒レーザを照射することで、アブレーションにより直径 <math>8.2 \pm 3.1 \mu\text{m}</math>、アスペクト比 190 以上の小径・深穴あけ加工が達成できたことを示し、加工穴が進展する様子を高速度カメラで観察し、深穴あけのメカニズムについて考察している。その中で、レーザのパルス数の増加に従い、レーザ照射過程において一旦加工された穴の直径が小さくなる現象を確認し、その原因が穴の底部で生成した熔融飛散物の穴の側面への再付着であることを明らかにしている。また、照射レーザの空間強度分布（ビームプロファイル）の影響についても調べると共に、焦点距離 20–50 mm のレンズを用いた場合に深さ 2200 <math>\mu\text{m}</math> 以上の高アスペクト比の穴あけ加工が可能であることを確認している。この理由を明らかにするために、加工穴の深さ方向におけるレーザのフルエンスの変化を測定し、穴のより深い部分においてフルエンスが上昇する傾向にあることを明らかにし、穴の内面での入射レーザの反射により、レーザビームが深部に導光されたことがその要因と考察している。また、繰返し周波数の影響についても調べ、繰返し周波数が大きいほど 1 パルスあたりの除去量が多いことを実証し、深穴あけにおいては、レーザパルスの熱蓄積の利用が効果的であることを示している。</p> <p>第二章では、ガラス裏面に銅箔を接触させた状態で Ar イオンレーザ（波長 514.5 nm, 488.0 nm）を照射し、密度変化領域（局所熔融領域）が裏面からレーザ照射面に向かって 200 mm/s 程度の速度で誘起できることを確認し、この現象の動的挙動を高速度カメラで観察することで、500 <math>\mu\text{s}</math> 程度の時間スケールでレーザによる加熱、冷却が完了することで密度変化領域（局所熔融領域）が形成されることを明らかにしている。また、変化領域の形成過程におけるレーザ光の透過率変化を調べることで、透過光量が 5%程度まで減少することを確認し、変化領域形成過程における温度上昇に伴いガラスの吸収係数が大きくなることを示している。さらに、熱伝導によるシミュレーションモデルを提案し、予測した温度分布の変化をもとにシミュレーションにより得られた結果と実際に形成した密度変化領域との比較を行うことで、照射エネルギーの上昇に</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	伊 東 翔
<p>           伴い変化領域の移動速度が大きくなる現象の再現に成功している．また，ガラス裏面の金属として銅箔の代わりにスパッタにより厚さ数 <math>\mu\text{m}</math> の Pt 膜を形成させた試料にレーザー照射を行うことで，直径 3–50 <math>\mu\text{m}</math> 程度の Pt 微粒子がガラス内部を移動する興味深い現象も見出している．Pt 膜のケースでは，Pt 微粒子の導入（移動）速度が 10 mm/s 程度であり，前記の銅箔における密度変化領域の形成速度の 1/20 程度と遅く，またレーザー照射後に材料全体が冷却された状態であっても，再びレーザーを照射することにより微粒子の再移動が起こり，銅箔による内部改質現象と異なる点があることを確認している．同様に数種類の金属膜で検討することで，Ni や SUS304 では Pt と同じく金属微粒子となってガラス中に導入されるのに対して，Ta, Sn, Ag では Cu のように金属微粒子の導入が起こらないことを確認している．この原因を明らかにするため各金属のレーザー照射による温度変化を調べた結果，Pt, Ni や SUS304 ではレーザー照射後 0.01 秒で，ガラスの軟化点以上の温度に到達するのに対して，Ag, Cu については，1 秒間経過後も軟化点を超えない（最大 1000 K 程度）ことを確認し，この結果により挙動に違いが出ると結論付けている．         </p> <p>           第三章では，薄板ガラス基板に波長 355 nm の UV パルスレーザーを，ガラス裏面よりさらに外側に集光させることで，基板裏面からナノファイバーが生成する新しい現象を見出すとともに，その生成メカニズムについて調べている．生成したファイバーの平均直径は約 300 nm であり，ナノファイバーの一部や末端に直径数 <math>\mu\text{m}</math> の球状部があることを確認している．裏面からナノファイバーが生成するメカニズムを明らかにするため，生成時の挙動を観察した結果，レーザーの照射部付近が溶融していることを明らかにし，ガラスの溶融・軟化がナノファイバー生成の必要条件であることを示している．さらに高速度カメラを用いた観察光学系を構築し，ナノファイバーが生成する過程において，ガラス内部に直径数十 <math>\mu\text{m}</math> のボイドが形成されることを確認している．同時に，このボイドが収縮を伴いながら進展する様子の観察に成功し，ボイドがガラス基板の裏面付近に達した際，溶融ガラスが裏面において約 1 MPa の圧力で押し上げられ，溶融ガラスが約 50 m/s の速度で外側へ放出されることでナノファイバーが生成することを明らかにしている．         </p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、ガラスの新規用途開拓を目的とした、各種レーザによる微細加工方法の開発と加工メカニズムを研究した成果についてまとめたものであり、本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 半導体の高密度配線などに応用可能なガラスの小径・深穴あけ加工について述べている。波長 266 nm のパルスレーザにより、直径  $8.2 \pm 3.1 \mu\text{m}$ 、アスペクト比が 190 の穴あけを達成している。加工穴の断面プロファイルの照射回数による変化を調べ、底面で除去された物質が穴壁面に堆積する現象を確認している。また、ビームプロファイルの影響を調べ、特に穴が深い場合、穴を透過するエネルギーのフルエンスが増大することを確認し、穴壁面における多重反射の影響と考察している。さらに、熱蓄積の影響が見積もられ、パルスの繰返し周波数が大きいほど、1 パルス当たりの除去量が多いことを実証している。

(2) 光導波路への応用が期待できるガラスの内部改質（密度変化領域の誘起）について述べている。ガラスと銅（吸収材）とを接触させた状態で可視光の連続発振レーザを照射し、密度変化領域が約 200 mm/s で形成する様子の観察に成功している。また、レーザの透過光量の変化を計測し、改質時に透過光量が初期値の 5% まで低下することを確認している。さらに、吸収材として白金、ニッケル、ステンレスを用いることにより、その一部を直径 3–50  $\mu\text{m}$  の微小球としてガラス内部に約 10 mm/s の速度で導入できることを見出すとともに、金属の吸収係数と熱伝導率から導入条件をシミュレーションすることにより、吸収材の融点と熱伝導率が大きく影響することを明らかにしている。

(3) 医療・光学材料などへの応用が期待されるガラスナノファイバーの生成について述べている。波長 355 nm のパルスレーザを薄板ガラスに照射することにより、基板の裏面から平均直径が約 300 nm のナノファイバーを生成することに成功している。ナノファイバー形成プロセスを解明する目的で、高速度カメラを使用し、ガラスが熔融・軟化する挙動やガラス内部にボイドが形成する過程およびボイド形成により熔融ガラスが押し上げられ、約 50 m/s の速度で飛散する過程の直接観察に成功している。

以上、本論文は、ガラスの新たな応用のための小径・深穴あけ、内部改質、ナノファイバー生成についてレーザによるプロセスの提案と、各加工メカニズムについて述べられており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 28 年 8 月 10 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日：平成 28 年 1 2 月 23 日以降